2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки)

УДК 665.75
DOI: 10.31660/0445-0108-2022-3-83-95

Выделение твердых парафинов из тяжелых нефтяных фракций в электрическом поле

А. Л. Савченков*, С. Г. Агаев, О. П. Дерюгина, Е. Н. Скворцова, А. Г. Мозырев

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
**savchenkoval@tyuiu.ru*

Аннотация. Процесс выделения твердых парафинов из тяжелых нефтяных фракций является одним из самых дорогостоящих и сложных в аппаратурном оформлении в нефтепереработке. Депарафинизация обычно проводится методом низкотемпературной кристаллизации твердых парафинов в присутствии многократного избытка избирательных растворителей. Поиски других, более простых и недорогих технологий выделения твердых парафинов являются актуальной задачей. В некоторых работах российских исследователей показана возможность депарафинизации масляных фракций в электрическом поле.

В работе изучено влияние основных параметров процесса депарафинизации масляного рафината фракции 420–490 °С в электрическом поле на качественные показатели процесса. Установлено, что форма электрического поля и степень его неоднородности не влияют на целевые показатели. Повышение напряженности электрического поля до определенного предела приводит к снижению необходимого времени для завершения процесса электроосаждения. Увеличение температуры процесса приводит к выделению более высокоплавких парафинов. Полное выделение твердых парафинов в электрическом поле зависит от напряженности поля, температуры процесса, типа и концентрации вводимой присадки.

Ключевые слова: твердые парафины, электроосаждение, неоднородное электрическое поле, гач

Для цитирования: Выделение твердых парафинов из тяжелых нефтяных фракций в электрическом поле / А. Л. Савченков, С. Г. Агаев О. П. Дерюгина [и др.]. – DOI 10.31660/0445-0108-2022-3-83-95 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2022. – № 3. – С. 83–95.

Separation of solid paraffins from heavy oil fractions in an electric field

Andrey L. Savchenkov*, Slavik G. Agaev, Olga P. Deryugina, Elena N. Skvortsova, Andrey G. Mozyrev

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
**savchenkoval@tyuiu.ru*

Abstract. The process of separating solid paraffins from heavy oil fractions is one of the most expensive and difficult to implement in oil refining. Dewaxing is usually carried out by the method of low-temperature crystallization of solid paraffins in the presence of a multiple excess of selective solvents. The search for other, simpler and inexpensive technologies for the isolation of solid paraffins is an urgent task. Some Russian scientists devoted their work to studying the possibility of dewaxing oil fractions in an electric field.

These article deals with the influence of the main parameters of solid paraffin hydrocarbons electrodeposition in an electric field on the qualitative parameters of the process. It has been established that the shape of the electric field and the degree of its inhomogeneity don't affect the target indicators. Increasing the electric field strength to a certain limit leads to a decrease in the required time to complete the electrodeposition process. Increasing the process temperature leads to the release of higher melting paraffins. The complete release of solid paraffins in an electric field depends on the field strength, process temperature, type and concentration of the introduced additive.

Keywords: solid paraffins, electrodeposition, non-uniform electric field, slack wax

For citation: Savchenkov, A. L., Agaev, S. G., Deryugina, O. P., Skvortsova, E. N., & Mozyrev, A. G. (2022). Separation of solid paraffins from heavy oil fractions in an electric field. Oil and Gas Studies, (3), pp. 83-95. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2022-3-83-95

Введение

Твердые парафиновые углеводороды входят в состав почти всех нефтей и при первичной переработке концентрируются в тяжелых фракциях — мазуте и гудроне. При глубокой переработке мазута твердые парафины концентрируются в вакуумном газойле или в масляных фракциях. Выделение твердых парафинов из тяжелых фракций необходимо, во-первых, для снижения их температуры застывания и, во-вторых, для использования выделенных парафинов в качестве ценного сырья нефтехимии, а также для других целей [1]. Возможность выделения парафиновых углеводородов в электрическом поле показана в работах [2–5]. Исследования по электроосаждению проводятся также зарубежными учеными. Некоторые из результатов представлены в работах [6–11].

Цель нашей работы — исследование влияния параметров на показатели процесса депарафинизации дистиллятного масляного рафината фракции 420–490 ºС.

Объект и методы исследования

Для исследований процесса выделения твердых парафинов за основу была взята схема установки, которая описывается в работах [12–14]. Установка состоит из стабилизатора напряжения, выпрямителя, конденсатора, киловольтметра и термостатированной камеры, в которую помещалась ячейка. Установка питается от сети однофазного тока частотой 50 Гц, напряжением 220 В. Регулирование выпрямленного напряжения производится плавно в пределах от 0 до 25 кВ. Номинальный ток нагрузки составлял 10 мА. Ячейка имеет контакты для подсоединения клемм от источника напряжения. Киловольтметр подключается параллельно электродам ячейки.

В качестве сырья, содержащего твердые парафиновые углеводороды, использован дистиллятный масляный рафинат фракции 420–490 °С — продукт вакуумной перегонки мазута, очищенный от смол и полициклических

ароматических углеводородов. Физико-химические свойства рафината представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства масляного рафината

Показатель	Значение
Пределы выкипания, ºС	420–490
Температура застывания, ºС	37
Плотность при 70 ºС, кг/м^3	874
Показатель преломления при 70 ºС	1,4712
Кинематическая вязкость при 50 ºС, мм^2/с	29,5
Кинематическая вязкость при 100 ºС, мм^2/с	7,4
Содержание фенола, % масс.	0,001

Для выделения парафинов в электрическом поле из сырья необходимы присадки (ПАВ — поверхностно-активные вещества), индуцирующие электрический заряд на поверхности кристаллов твердых парафиновых углеводородов. В качестве ПАВ исследованы сложноэфирные депрессорные присадки, представляющие собой продукты конденсации синтетических жирных кислот фракции C_{21}–C_{25}, пентаэритрита и дикарбоновых кислот или их ангидридов — фталевого ангидрида (присадка ТюмИИ 77), 4-нитрофталевой кислоты (присадка ТюмИИ 79) и малеинового ангидрида (присадка ТюмИИ 200) [15, 16].

Электродепарафинизацию масляного рафината проводили с использованием известной методики [2, 4]. Смесь сырья и расчетное количество присадки подвергались термообработке при температуре выше температуры помутнения смеси (60–70 °С) до полного растворения твердых парафиновых углеводородов и присадки. После термообработки сырье переносилось в ячейку, предназначенную для выделения парафиновых углеводородов на электродах. Ячейка, изготовленная из латуни, охлаждалась в холодильнике до температуры депарафинизации. При необходимости сырье в ячейке подвергалось гомогенизации. Ячейка подключалась к источнику тока, и на нее подавалось необходимое напряжение. По окончании установленного времени воздействия электрического поля на систему прекращали подачу напряжения на электроды сначала отключением выпрямителя от стабилизатора, затем стабилизатора от сети. После чего снимали остаточное напряжение на электродах ячейки простым их замыканием и отсоединяли клеммы источника напряжения от ячейки. Эффективность электродепарафинизации оценивали по следующим показателям: по выходу масла (% масс. от сырья), температуре застывания депарафинированного масла (депмасла) и температуре плавления твердых парафиновых углеводородов (гача). Чем выше выход масла и ниже его температура застывания и чем выше температура плавления гача, тем эффективнее процесс депарафинизации. Кроме этого, эффективность процесса оценивалась путем

сравнения показателей преломления при 70 °С рафината, депмасла и гача. По сравнению с показателем преломления исходного сырья показатель преломления масла повышается, а гача уменьшается. Чем больше разница между показателями преломления рафината и получаемых из него продуктов, тем более эффективен процесс электроосаждения. В общем случае эффективность процесса можно оценивать разницей показателей преломления депмасла и гача.

В работе изучено влияние на качество получаемых из масляного рафината продуктов следующих параметров процесса электродепарафинизации:

а) формы электрического поля, степени его неоднородности, зависящей в первую очередь от конструкции ячейки;

б) напряженности электрического поля, зависящей от величины напряжения, подаваемого на электроды, и от конструкции ячейки;

в) времени воздействия электрического поля на сырье;

г) температуры электродепарафинизации.

Результаты и обсуждение

Известно, что форма электрического поля, степень его неоднородности при разделении дисперсных систем в электрическом поле отражаются на характере и величине различных электрических сил, действующих на дисперсную частицу. В однородном электрическом поле разделение дисперсной системы происходит в основном за счет одной силы — электрофоретической, тогда как в неоднородном поле, в зависимости от свойств дисперсионной среды и частиц, появляется возможность увеличить действующую на частицу силу за счет диполофоретической или диэлектрофоретической силы [17]. Для установления влияния формы электрического поля и степени его неоднородности были проведены исследования процесса электроосаждения в однородном электрическом поле, создаваемом системой плоских параллельных электродов — пластин из нержавеющей стали, а также в неоднородном поле, создаваемом системой двух коаксиальных цилиндров. Коаксиальные цилиндры были выполнены с разным отношением их диаметров, что позволило оценить влияние степени неоднородности электрического поля.

Остальные параметры процесса были постоянными: концентрация присадки ТюмИИ 200 в рафинате 0,75 %, температура электроосаждения +20 °С, средняя напряженность электрического поля $E_{ср}$= 10 кВ/см, время осаждения 60 мин.

Электроосаждение в ячейках с коаксиальной системой электродов проводили таким образом, чтобы центральный электрод соединялся с положительным, а внешний электрод — с отрицательным полюсом выпрямителя. При такой полярности электродов действующая на частицу сила будет складываться из электрофоретической (вследствие отрицательного заряда кристаллов парафина со сложноэфирной присадкой) и диполофоретической (за счет поляризации двойного электрического слоя — ДЭС).

Направленность диполофоретической силы к центру ячейки обусловлена большей плотностью электрического поля у центрального электрода, так как для коаксиальной системы электродов максимальная напряженность электрического поля будет на внешней поверхности внутреннего

электрода, а минимальная — на внутренней поверхности наружного электрода. При этом напряженность электрического поля на внешней поверхности центрального электрода E_r, на внутренней поверхности внешнего электрода E_R, градиент электрического поля Grad E выражаются следующим образом [15]:

$$E_r = \frac{U}{r \cdot \ln\frac{R}{r}}, кВ/см,$$

$$E_R = \frac{U}{R \cdot \ln\frac{R}{r}}, кВ/см,$$

$$Grad\ E = \frac{U}{R \cdot r \cdot \ln\frac{R}{r}}, кВ/см^2,$$

где U — напряжение, подаваемое на электроды, кВ; r — радиус центрального электрода, см; R — радиус внешнего электрода, см.

В таблице 2 приведены основные размеры использованных в работе ячеек с коаксиальной системой электродов и основные параметры электрического поля при $E_{ср}$ = 10 кВ/см. Материал полеобразующих электродов — латунь.

Таблица 2

Характеристика ячеек с коаксиальной системой электродов и параметры электрического поля при напряженности поля $E_{ср}$ = 10 кВ/см

Номер ячейки	Радиус электрода, м		$\frac{R}{r}$	Напряженность электрического поля, кВ/см		Градиент напряженности электрического поля Grad E, кВ/см^2
	Внешнего R	Внутреннего r		E_R,	E_r	
1	0,025	0,020	1,25	8,9	11,2	4,5
2	0,025	0,015	1,67	7,8	13,1	5,2
3	0,025	0,010	2,00	7,2	14,4	7,2
4	0,025	0,010	2,50	6,5	16,3	6,5
5	0,025	0,005	5,00	5,0	24,8	9,9

Возникновение диэлектрофоретической силы при незначительной разнице диэлектрических проницаемостей дисперсионной среды (масла) и дисперсных частиц (твердых парафиновых углеводородов) сомнительно, эта разница должна быть не менее двух.

Поляризация материала частиц твердых парафиновых углеводородов, необходимая для возникновения диэлектрофоретической силы, возможна при значениях напряженности электрического поля более 30 кВ/см.

Напряженности 10 кВ/см, что имело место в эксперименте, для этого явно недостаточно.

Результаты экспериментальных данных, представленные в таблице 3, показывают, что выход депмасла, температура плавления гача, а также их показатели преломления почти не зависят от формы электрического поля и степени его неоднородности: выход масла находится на уровне 81,2–83,3 масс. %, температура плавления гача 51,4–52,2 °С, показатель преломления масла 1,4730, гача — в пределах 1,4626–1,4631. При переходе от однородного поля к неоднородному и с увеличением степени его неоднородности наблюдается снижение температуры застывания получаемого депмасла с 12 до 8 °С.

Таблица 3

Влияние формы и степени неоднородности электрического поля на показатели процесса электродепарафинизации рафината при +20 °С в присутствии 0,75 масс. % присадки ТюмИИ 200; $E_{ср}$ = 10 кВ/см, время осаждения 60 мин

Форма электрического поля	Тип электродов	Отношение диаметров $\frac{R}{r}$	Выход масла, масс. %	Температура застывания масла, °С	Температура плавления гача, °С	Показатель преломления при 70 °С	
						Масла	Гача
Однородное	Параллельные пластины	–	82,7	12	52,0	1,4730	1,4630
Неоднородное	Коаксиальные цилиндры	1,25	81,2	12	51,4	1,4730	1,4633
		1,67	82,1	10	52,1	1,4730	1,4629
		2,00	83,3	9	52,1	1,4730	1,4628
		2,50	82,2	8	52,2	1,4730	1,4626
		5,00	82,1	8	51,9	1,4730	1,4631

Таким образом, исходя из полученных экспериментальных данных, можно заключить, что на показатели процесса электродепарафинизации масляного рафината оказывает влияние в основном электрофоретическая сила, действующая на отрицательно заряженные частицы твердых парафиновых углеводородов. Изменение формы электрического поля с целью увеличения результирующей силы, действующей на частицы, за счет диполофоретической силы, не дает эффекта, что, по-видимому, объясняется незначительной ее величиной по сравнению с электрофоретической силой. Тем не менее полностью влияние диполофоретической силы на результаты процесса электродепарафинизации в неоднородном поле отрицать нельзя, о чем свидетельствует некоторое снижение температуры застывания получаемого депмасла.

Для дальнейших исследований была выбрана ячейка № 3 (см. табл. 2) с коаксиальной системой электродов, на которой были исследованы остальные параметры процесса электродепарафинизации.

Исследование влияния напряженности электрического поля (под напряженностью электрического поля здесь и далее будет пониматься

средняя напряженность $E_{ср}$) на показатели процесса проводили также при постоянных значениях остальных параметров: концентрация присадки ТюмИИ 77 0,5 масс. %, температура электродепарафинизации +20 °С время осаждения 30 мин. Результаты экспериментальных данных приведены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние напряженности электрического поля на показатели процесса электродепарафинизации рафината при температуре +20 °С в присутствии 0,5 масс. % присадки ТюмИИ 77; время осаждения 30 мин

Напряженность электрического поля, кВ/см			Градиент напряженности, кВ/см^2	Выход масла, масс. %	Температура застывания масла, °С	Температура плавления гача, °С	Показатель преломления при 70 °С	
$E_{ср}$	E_R	$E_г$					Масла	Гача
2	1,4	2,9	1,4	Разделение неполное	7	52,4	1,4720	1,4623
4	2,9	5,8	2,9	86,9	8	53,5	1,4730	1,4614
6	4,3	8,7	4,3	86,5	10	54,3	1,4730	1,4609
8	5,8	11,5	5,8	86,1	15	54,2	1,4730	1,4610
10	7,2	14,4	7,2	86,9	17	54,5	1,4730	1,4608
12	8,7	17,3	8,7	87,7	19	55,0	1,4730	1,4604
14	10,1	20,2	10,1	87,2	19	55,0	1,4730	1,4605
16	11,5	23,1	11,5	Электрический пробой				

Результаты показали, что полное разделение фаз системы наблюдается при напряженности электрического поля 4–14 кВ/см. До 4 кВ/см полного удаления кристаллов парафина из сырья не происходит — получаемое депмасло визуально мутное, его показатель преломления низкий. При напряженности поля более 14 кВ/см возникает электрический пробой системы. Выход масла и его показатель преломления в области напряженности электрического поля 4–14 кВ/см практически не изменяются, но наблюдается рост температуры застывания масла. С увеличением напряженности электрического поля температура плавления гача увеличивается с 52,4 до 55,0 °С с одновременным снижением его показателя преломления с 1,4623 до 1,4605. Это свидетельствует об уменьшении содержания масла в получаемом гаче.

Было изучено также влияние напряженности электрического поля на время полного завершения процесса электроосаждения. Исследования проводили при концентрации присадки ТюмИИ 79 0,1 масс. % и температуре осаждения +20 °С. Время завершения электроосаждения фиксировали как время полного осветления объема масла от кристаллов парафиновых углеводородов, о чем судили визуально. Результаты экспериментальных данных представлены на рисунке 1.

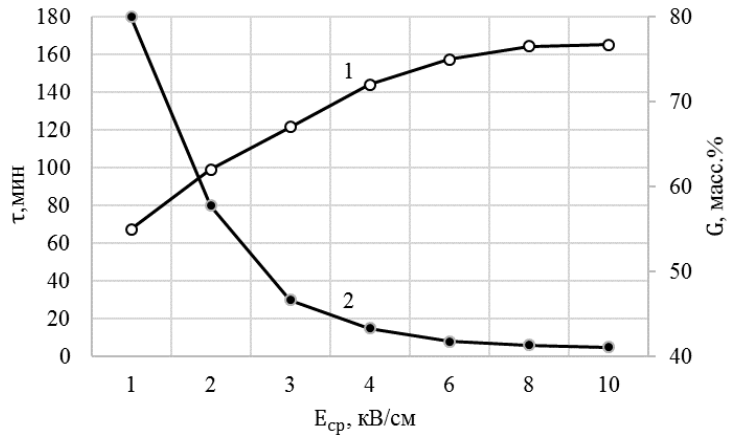

Рис. 1. ***Зависимость выхода масла G (кривая 1) и времени завершения процесса осаждения τ (кривая 2) от напряженности электрического поля $E_{ср}$ при электродепарафинизации масляного рафината в присутствии 0,1 масс. % присадки ТюмИИ 79; температура электродепарафинизации +20 °С***

Как следует из представленных на рисунке 1 данных, повышение напряженности электрического поля с 1 до 4 кВ/см приводит к резкому снижению времени осаждения со 180 до 15 мин и увеличению выхода масла с 55 до 72 масс. %. При дальнейшем увеличении напряженности до 10 кВ/см изменение этих показателей незначительно: выход масла увеличивается на 2–3 масс. %, время осаждения уменьшается с 15 до 4 мин. Эти результаты объясняют причину нечеткого разделения рафината при напряженности поля 2 кВ/см (см. табл. 4) — времени 30 мин недостаточно для завершения электроосаждения.

Исследования влияния времени электроосаждения проводили при напряженности электрического поля 10 кВ/см, концентрации присадки ТюмИИ 200 в рафинате 0,75 масс. % и температуре электродепарафинизации +20 °С. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

Влияние времени осаждения на показатель процесса электродепарафинизации рафината при +20 °С в присутствии 0,75 масс. % присадки ТюмИИ 200, $E_{ср}$= 10 кВ/см

Время осаждения, мин	Выход масла, масс. %	Температура застывания масла, °С	Температура плавления гача, °С	Показатель преломления при 70 °С	
				Масла	Гача
2,5	Электроосаждения нет				
5,0	95,1*	8	51,5	1,4715	1,4652
10,0	93,0*	8	51,5	1,4719	1,4655
15,0	92,8*	10	51,8	1,4718	1,4650
20,0	83,5	14	52,0	1,4730	1,4650
30,0	83,4	13	52,0	1,4730	1,4651
60,0	83,6	14	52,0	1,4730	1,4650

*Примечание: * — мутное масло*

Как следует из представленных в таблице 5 экспериментальных данных, разделение рафината происходит не сразу после наложения электрического поля, а спустя некоторое время. При воздействии поля в течение 5–15 мин полного разделения фаз не происходит — депмасло мутное, его показатель преломления низкий. Выход масла с увеличением времени осаждения до 15 мин несколько уменьшается, затем стабилизируется. Полное разделение фаз системы наблюдается при времени осаждения 20 мин и более. При этом выход масла, его показатель преломления и температура застывания не зависят от времени осаждения. Температура плавления получаемого гача почти не зависит от времени электроосаждения, что говорит об однородности состава осаждающихся во времени кристаллов парафиновых углеводородов.

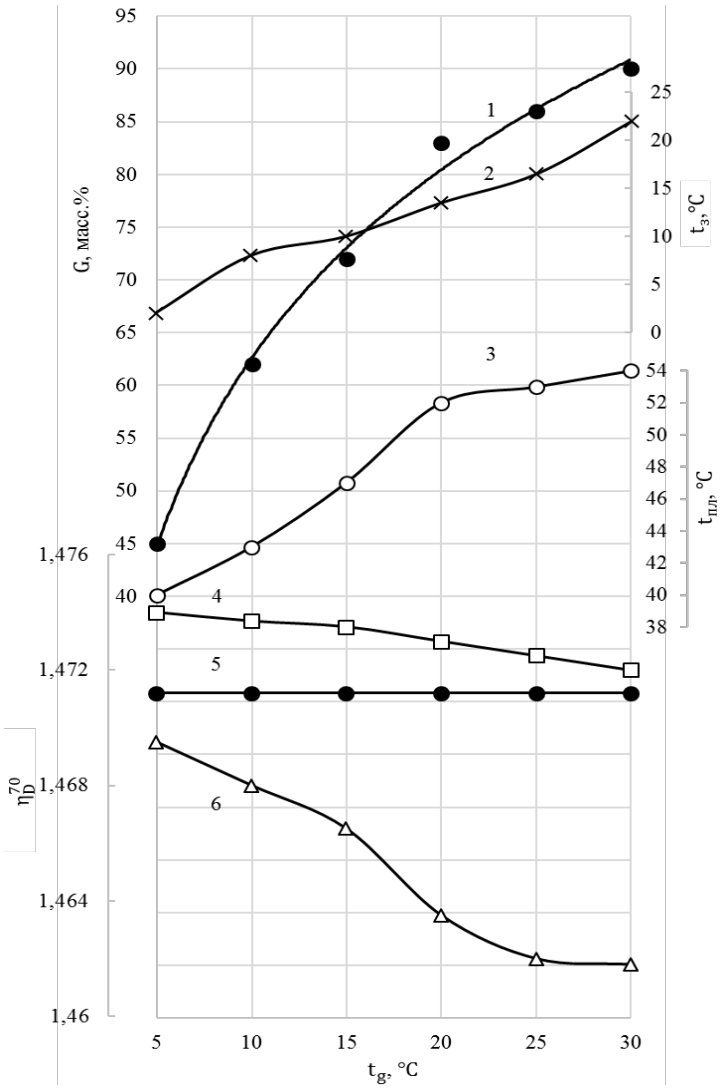

Рис. 2. ***Зависимости выхода масла G (кривая 1), температуры застывания $t_з$ масла (кривая 2), температуры плавления $t_{пл}$ гача (кривая 3), η_D^{70} показателя преломления масла (кривая 4), рафината (кривая 5) и гача (кривая 6) от температуры электродепарафинизации t_g масляного рафината***

Исследование влияния температуры электроосаждения проводилось при концентрации присадки ТюмИИ 200 в рафинате 0,75 масс. %, напряженности электрического поля 10 кВ/см и времени осаждения 60 мин. Результаты экспериментальных данных представлены на рисунке 2.

Из представленных на рисунке 2 экспериментальных данных следует, что с увеличением температуры электроосаждения с +5 до +30 °С выход масла, его температура застывания, а также температура плавления гача увеличиваются; показатели преломления масла и гача уменьшаются. Полученные зависимости объясняются тем, что процесс электроосаждения основан на отделении образовавшейся дисперсной фазы от дисперсионной среды, значит, качество продуктов, их углеводородный состав будут зависеть в первую очередь от температуры дисперсной системы, то есть температуры электроосаждения. Уменьшение температуры системы приводит к переходу в дисперсную фазу более низкоплавких парафиновых углеводородов, что ведет к снижению температуры застывания дисперсионной среды (депмасла). Переход низкоплавких парафинов в дисперсную фазу приводит к снижению температуры плавления получаемого гача. Кроме этого, с понижением температуры системы происходит увеличение вязкости среды, что затрудняет перемещение и осаждение частиц в электрическом поле. В пределе, с понижением температуры значительное структурирование системы обусловит невозможность разделения фаз данным способом. Так как процесс электроосаждения осуществляется без разбавления рафината растворителями, то в дисперсную фазу будут переходить углеводороды с температурой плавления выше температуры осаждения. Таким образом, изменяя температуру системы (электроосаждения), можно регулировать углеводородный состав получаемых при разделении фаз продуктов.

Выводы

Показана возможность выделения твердых парафиновых углеводородов из масляной фракции 420–490 °С в присутствии сложноэфирных присадок в постоянном электрическом поле. Изучено влияние формы, напряженности электрического поля, степени его неоднородности, температуры и времени электроосаждения на показатели процесса.

Установлено, что выход депарафинированного масла, температура плавления гача, а также их показатели преломления не зависят от формы электрического поля и степени его неоднородности. На эффективность процесса электроосаждения твердых парафинов в основном оказывает влияние электрофоретическая сила, действующая на отрицательно заряженные кристаллы твердых парафинов.

Полное разделение масляного рафината в электрическом поле происходит при напряженности поля от 1 до 14 кВ/см. С увеличением напряженности поля от 1 до 10 кВ/см наблюдается значительное снижение необходимого времени завершения процесса до полного выделения твердых парафинов со 180 до 4 минут. Время завершения электроосаждения твердых парафинов зависит от напряженности электрического поля, температуры процесса, типа и концентрации сложноэфирной присадки.

С увеличением температуры электроосаждения наблюдается увеличение температуры плавления выделяемых твердых парафинов, что явля-

ется следствием формирования дисперсной фазы из более высокомолекулярных парафинов. В дисперсную фазу переходят парафины с температурой плавления выше температуры процесса электроосаждения.

Список источников

1. Переверзев, А. Н. Производство парафинов / А. Н. Переверзев, Н. Ф. Богданов, Ю. Н. Рощин. – Москва : Химия, 1973. – 224 с. – Текст : непосредственный.
2. Агаев, С. Г. Депарафинизация масляного сырья в электрическом поле / С. Г. Агаев, А. Н. Халин. – Текст : непосредственный // Химия и технология топлив и масел. – 2001. – № 3. – С. 38–42.
3. Агаев, С. Г. Депарафинизация летнего дизельного топлива Антипинского НПЗ в постоянном электрическом поле высокого напряжения / С. Г. Агаев, Н. С. Яковлев, Е. Ю. Зима. – Текст : непосредственный // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2011. – № 10. – С. 6–8.
4. Агаев, С. Г. Распределение н-алканов в продуктах электродепарафинизации дизельного топлива / С. Г. Агаев, Н. С. Яковлев. – DOI 10.7868/S0028242118020028. – Текст : непосредственный // Нефтехимия. – 2018. – Т. 58, № 2. – С. 125–129.
5. Агаев, С. Г. Электродепарафинизация дизельных топлив / С. Г. Агаев, С. В. Гультяев. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2006. – № 3 (57). – С. 72–76.
6. Roa, M. Study of an asphaltene electrodeposition strategy for Colombian extra-heavy crude oils boosted by the simultaneous effects of an external magnetic field and ferromagnetic composites / M. Roa, J. M. Cruz-Duarteb, R. Correa. – Text : electronic // Fuel. – 2021. – Vol. 287. – URL: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119440.
7. Effects of the particle concentration on the electro-dehydration of simulated SAGD produced ultra-heavy oil / B. Li, Z. Sun, Z. Wang [et al.]. – DOI 10.1016/j.cherd.2019.09.004. – Direct text // Chemical Engineering Research and Design. – 2019. – Vol. 151. – P. 157–167.
8. Strelets, L. A. Effect of enhanced oil recovery on the composition and rheological properties of heavy crude oil / L. A. Strelets, S. O. Ilyin. – Text : electronic // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 203. – URL: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108641.
9. Heavy Crude Oils/Particle Stabilized Emulsions / I. Kralova, J. Sjöblom, G. Øye [et al.]. – DOI 10.1016/j.cis.2011.09.001. – Direct text // Advances in Colloid and Interface Science. – 2011. – Vol. 169, Issue 2. – P. 106–127.
10. The study of asphaltene desorption from the iron surface with molecular dynamics method / M. Hekmatifar, D. Toghraie, A. Khosravi [et al.]. – DOI 10.1016/j.molliq.2020.114325. – Direct text // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 318. – P. 10–19.
11. Study of asphaltene adsorption onto raw surfaces and iron nanoparticles by AFM force spectroscopy / J. Castillo, V. Vargasa, V. Piscitelli [et al.]. – DOI 10.1016/j.petrol.2017.01.019. – Direct text // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 151. – P. 248–253.
12. Савченков, А. Л. Влияние маслорастворимых присадок на электрокинетические и депрессорные свойства дистиллятного рафината из смеси нефтей Западной Сибири / А. Л. Савченков, С. Г. Агаев. – Текст : непосредственный // Нефть и газ. – 1989. – № 11. – С. 41–45.

13. Савченков, А. Л. О распределении сложноэфирных депрессорных присадок в масляном рафинате / А. Л. Савченков, С. Г. Агаев. – Текст : непосредственный // Химия и технология топлив и масел. – 1991. – № 5. – С. 29–30.

14. Агаев, С. Г. Электродепарафинизация Уренгойской нефти / С. Г. Агаев, А. Л. Савченков. – Текст : непосредственный // Химия и технология топлив и масел. – 1996. – № 6. – С. 18–19.

15. Агаев, С. Г. Диэлектрические и электрофоретические свойства парафинсодержащих дисперсий / С. Г. Агаев, Л. В. Таранова – Текст : непосредственный // Химия и технология топлив и масел. – 1986. – № 10. – С. 27–29.

16. Агаев, С. Г. Улучшение низкотемпературных свойств высокопарафинистых масел с помощью композиций сложных эфиров пентаэритрита и депрессатора АзНИИ / С. Г. Агаев, Л. В. Таранова. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1986. – № 1. – С. 39–43.

17. Духин, С. С. Электрофорез / С. С. Духин, Б. В. Дерягин ; АН СССР, Ин-т физ. химии. – Москва : Наука, 1976. – 328 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Pereverzev, A. N., Bogdanov, N. F., & Roshchin, Yu. N. (1973). Proizvodstvo parafinov. Moscow, Khimiya Publ., 224 p. (In Russian).

2. Agaev, S. G., & Khalin, A. N. (2001). Dewaxing of lube stock in an electric field. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, (3), pp. 38-42. (In Russian).

3. Agaev, S. G., Yakovlev, N. S., & Zima, E. Yu. (2011). Dewaxing of summer diesel fuel of Antipinsky refinery in a high voltage constant electric field. Neftepererabotka i neftechimiya, (10), pp. 6-8. (In Russian).

4. Agaev, S. G., & Yakovlev, N. S. (2018). Distribution of n-alkanes in the products of electric dewaxing of diesel fuel. Petroleum Chemistry, 58(3), pp. 174-178. (In English). DOI 10.1134/S0965544118030027

5. Agaev, S. G. & Gultyaev, S. V. (2006). Elektrodeparafinizatsiya dizel'nykh topliv. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz, (3(57)), pp. 72-76. (In Russian).

6. Roa, M., Cruz-Duarteb, J. M., & Correa, R. (2021). Study of an asphaltene electrodeposition strategy for Colombian extra-heavy crude oils boosted by the simultaneous effects of an external magnetic field and ferromagnetic composites. Fuel, 287. (In English). Available at: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119440

7. Li, B., Sun, Z., Wang, Z., Wang, J., Wang, Z., Dou, X.,… Liu, H. (2019). Effects of the particle concentration on the electro-dehydration of simulated SAGD produced ultra-heavy oil. Chemical Engineering Research and Design, 151, pp. 157-167. (In English). DOI: 10.1016/j.cherd.2019.09.004

8. Strelets, L. A., & Ilyin, S. O. (2021). Effect of enhanced oil recovery on the composition and rheological properties of heavy crude oil. Journal of Petroleum Science and Engineering, 203. (In English). Available at: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108641

9. Kralova, I., Sjöblom, J., Øye, G., Simon, S., Grimes, B. A., & Paso, K. (2011). Heavy Crude Oils/Particle Stabilized Emulsions. Advances in Colloid and Interface Science, 169(2), pp. 106-127. (In English). DOI: 10.1016/j.cis.2011.09.001

10. Hekmatifar, M., Toghraie, D., Khosravi, A., Saberi, F., Soltani, F., Sabetvand, R., & Goldanlou, A. (2020). The study of asphaltene desorption from the iron surface with molecular dynamics method. Journal of Molecular Liquids, 318, pp. 10-19. (In English). DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114325

11. Castillo, J., Vargasa, V., Piscitelli, V., Ordoñez, L., & Rojas, H. (2017). Study of asphaltene adsorption onto raw surfaces and iron nanoparticles by AFM force spectroscopy. Journal of Petroleum Science and Engineering, 151, pp. 248-253. (In English). DOI: 10.1016/j.petrol.2017.01.019

12. Savchenkov, A. L., & Agaev, S. G. (1989). Vliyanie maslorastvorimykh prisadok na elektrokineticheskie i depressornye svoystva distillyatnogo rafinata iz smesi neftey Zapadnoy Sibiri. Neft' i gaz, (11), pp. 41-45. (In Russian).

13. Savchenkov, A. L., & Agaev, S. G. (1991). Distribution of ester pour-point depressants in oil raffinate. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 27(5), pp. 274-275. (In English).

14. Agaev, S. G. & Savchenkov, A. L. (1996). Electrodeparaffinization of Urengoy oil. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, (6), pp. 18-19. (In Russian).

15. Agaev, S. G. & Taranova, L. V. (1986). Dielectric and electrophoretic properties of wax dispersions in the presence of pour depressants. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 22(10), pp. 541-545. (In English).

16. Agaev S. G. & Taranova, L. V. (1986). Uluchshenie nizkotemperaturnykh svoystv vysokoparafinistykh masel s pomoshch'yu kompozitsiy slozhnykh efirov pentaeritrita i depressatora AzNII. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz, (1), pp. 39-43. (In Russian).

17. Dukhin, S. S., & Deryagin, B. V. (1976). Elektroforez. Moscow, Nauka Publ., 328 p. (In Russian).

Информация об авторах

Савченков Андрей Леонидович, *кандидат технических наук, доцент кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, savchenkoval@tyuiu.ru*

Агаев Славик Гамид оглы, *доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

Дерюгина Ольга Павловна, *кандидат технических наук, доцент кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

Скворцова Елена Николаевна, *кандидат технических наук, доцент кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

Мозырев Андрей Геннадьевич, *кандидат технических наук, заведующий кафедрой переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

Information about the authors

Andrey L. Savchenkov, *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen, savchenkoval@tyuiu.ru*

Slavik G. Agaev, *Doctor of Engineering, Professor, Chief Researcher at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen*

Olga P. Deryugina, *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen*

Elena N. Skvortsova, *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen*

Andrey G. Mozyrev, *Candidate of Engineering, Head of the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen*

Статья поступила в редакцию 12.04.2022; одобрена после рецензирования 19.04.2022; принята к публикации 25.04.2022.

The article was submitted 12.04.2022; approved after reviewing 19.04.2022; accepted for publication 25.04.2022.